

4. Михайлов В. В., Гудков Л. В., Терещенко А. В. Рациональное использование топлива и энергии в промышленности. М. : Энергия, 1978. 224 с.
5. Аловадинова Х. Н., Демин Ю. К., Матвеев С. В., Картавец С. В. Повышение энергетической эффективности процесса непрерывной разливки стали // Промышленная энергетика 2015. № 2. С. 8-11.
6. Абдулгужина И. Р., Матвеев С. В., Картавец С. В. Источник электроэнергии – теплота разливаемой стали в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции с международным участием и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых 16-19 декабря 2014 г. Екатеринбург : УрФУ, 2014. С. 46-47.
7. Салихов З. Г., Ишметьев Е. Н., Газизов Р. Т., Салихов К. З. Математическое моделирование механизма использования охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2010. № 3. С. 59-62.
8. Контроль процесса теплоотдачи от сляба в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / С. В. Зверев, Н.И. Шестаков [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 61-66.
9. Использование низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов при непрерывной разливке стали / М. Я. Якобсон, М. М. Лоринов, Б. Ф. Степаненко, З. А. Мурадова // Проблемы энергетики теплотехнологий : тезисы докладов 2-й Всесоюзной научной конференции, М., 1987. С. 9.
10. Лукин С. В., Поселожный Д. Н., Кибардин А. Н. Использование теплоты охлаждения стали в системе теплоснабжения предприятия // Промышленная энергетика, № 5. 2013. С. 7-9.
11. Куперман Л. И., Романовский С. А., Сидельковский Л. Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 303 с.
12. Андоньев С. М. Испарительное охлаждение металлургических печей / М.: Металлургия, 1970. 424 с.
13. Соболев В. В., Трефилов П. М. Процессы тепломассопереноса при затвердевании непрерывных слитков. Красноярск : Изд-во Красноярского университета, 1984. 264 с.

УДК 620.97

Абдуллин Р. Р., Скисов Г. Н., Филипповский Н. Ф.
Уральский федеральный университет
george.skisov@mail.ru

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОГНЕВОГО ЛИСТА КОТЛА УТИЛИЗАТОРА ЗА ПЕЧЬЮ ВАНЮКОВА

Аннотация. Разработана и верифицирована по полученным ранее экспериментальным данным модель для расчета температурного поля в огневом листе котла утилизатора. Получены и проанализированы температурные поля в огневом листе при различных условиях работы котла.

В работе [1] приведены результаты экспериментальных замеров термических сопротивлений передачи теплоты от огневого листа к охлаждающей воде,

циркулирующей в приваренных к листу трубах. Кроме того в ходе экспериментов с помощью тепловизора (testo 882) были получены распределения температур по поверхности огневого листа, сварочного шва и охлаждающей трубы. Эти данные позволяют верифицировать численные расчеты температурного поля в плоской модели сечения, перпендикулярного оси трубы. Расчеты проводились посредством пакета программ COMSOL Multiphysics. В процессе верификации уточнялись три расчетных параметра: коэффициенты теплоотдачи со стороны листа и внутри трубы (точно рассчитать их для условий эксперимента достаточно трудно из-за влияния окалины и сложного режима течения воды) и среднюю глубину проникновения металла при сварке в зазор между трубой и огневым листом. Все остальные размеры можно было достаточно точно замерить, а свойства материалов при расчетных температурах взять из справочников. Размер ячеек расчетной сетки уменьшали вдвое до тех пор, пока при числе элементов сетки 3520 расхождение по термическому сопротивлению с предыдущим расчетом не становилось меньше 1 %.

В процессе верификации установлено, что в ходе экспериментов достаточно сильное влияние на теплоотдачу внутри трубы оказывала прокатная окалина. Расчетное значение коэффициента теплоотдачи по условиям течения воды было более $20 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а фактическое - на уровне $\alpha_{\text{вн}} = 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что соответствует толщине окалины внутри трубы около 0,2 мм.

Полученная модель (рис. 1) позволяет рассчитать температурное поле в огневом листе для рабочих условий, при которых в трубах кипит вода с давлением 4,4 МПа и температурой 256°C . Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к кипящей воде в расчетах принимали с учетом окалины $\alpha_{\text{вн}} = 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и без нее - $\alpha_{\text{вн}} = 20 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Дальнейшее увеличение $\alpha_{\text{вн}}$ практически не влияло на результаты расчетов. Со стороны огневого листа охлаждается выходящий из печи газ следующего состава: $\text{SO}_2 - 27\%$; $\text{O}_2 - 3,6\%$; $\text{H}_2\text{O} - 24,7\%$; $\text{N}_2 - 38,1\%$; CO_2 и другие примеси - $6,6\%$, запыленность - $65 \text{ г}/\text{м}^3$. Температура газа на входе в котел утилизатор 1300°C . Коэффициент теплоотдачи от запыленного газа к огневому листу рассчитывали по законам излучения и получили значение $\alpha_{\text{л}} = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Критическим параметром в исследуемой конструкции является максимальная температура, которая, очевидно, будет по краям рассматриваемой модели огневого листа - в середине промежутка между приваренными трубами.

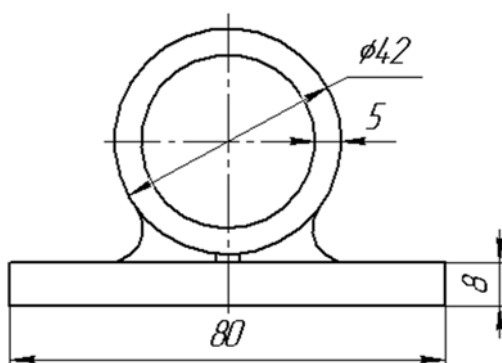


Рис. 1. Вид расчетной модели при хорошем качестве сварки

В условиях абсолютно чистого огневого листа и хорошего качества сварного шва расчетная максимальная температура получается более 700 °С даже при отсутствии окалины внутри трубы. Это выше допустимой рабочей температуры для стали 12Х1МФ (ЭИ575), из которой изготовлен огневой лист. Между тем, огневой лист в котле не разрушается. Причина в том, что на огневом листе в процессе работы образуется слой загрязнений (шлака), снижающий интенсивность теплоотдачи от раскаленных газов к огневому листу.

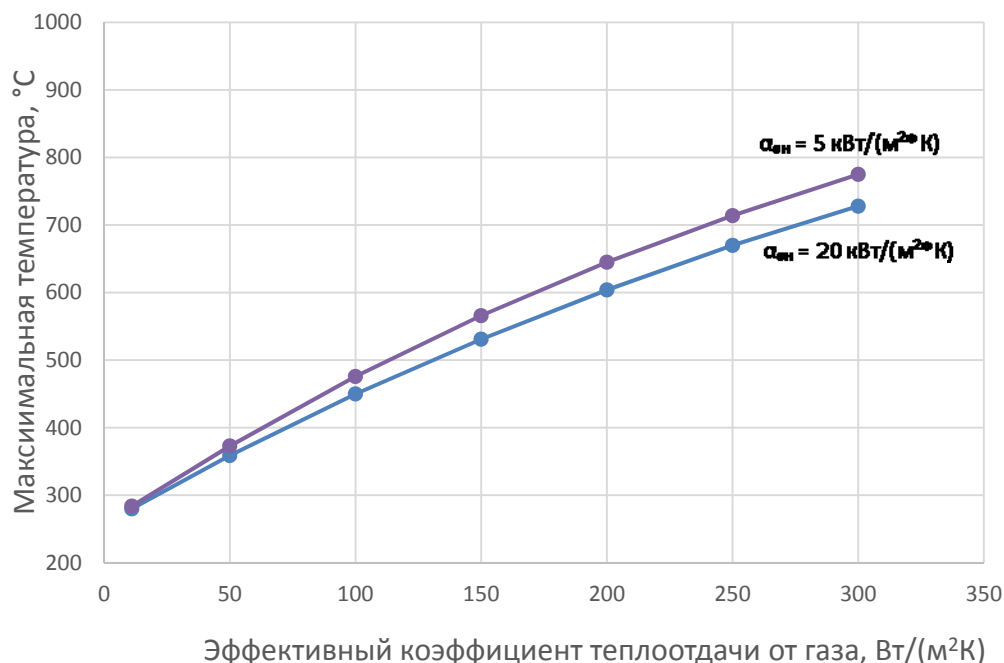


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры огневого листа от эффективного коэффициента теплоотдачи от газа (с учетом загрязнений)

Толщина слоя шлака на входе газов (в зоне наибольшей температуры) при работе котла достигает полуметра. Периодически (примерно раз в месяц) стенки огневого листа очищают от слоя шлака, но загрязнение быстро нарастает. Среднюю толщину слоя шлака (точнее его термическое сопротивление) на огневом листе первой по ходу газа секции котла утилизатора определяли из сравнения расчетной и реально замеренной температуры газа на выходе из этой секции. Расчетная температура совпадала с замеренной сразу после очистки котла от шлака при коэффициенте загрязнения $\varepsilon = 0,046 \text{ м}^2\text{К/Вт}$, а перед чисткой котла - $\varepsilon = 0,076 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Эффективный коэффициент теплоотдачи при этом составляет всего 22 и 13 Вт/(м²·К), а максимальная температура огневого листа менее 350 °С (рис. 2). Огневой лист для таких условий (и для значительно меньшей толщины загрязнений) можно изготавливать из обычной углеродистой стали и не принимать мер по удалению прокатной окалины с внутренней поверхности трубы для интенсификации теплопереноса.

Кроме того расчеты показали, что для снижения металлоемкости конструкции можно использовать трубы с меньшей толщиной стенки, максимальная температура огневого листа при прочих равных условиях даже немного снизится, а прочность останется вполне достаточной.

В то же время, следует иметь ввиду, что рассмотренная конструкция принципиально не работоспособна из-за локального перегрева при качественной очистке поверхности огневого листа в процессе работы, например, за счет частого интенсивного встряхивания.

Список использованных источников

1. Абдуллин Р. Р., Скисов Г. Н., Филипповский Н. Ф. Влияние качества сварного соединения на его теплопроводящие свойства // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» 16-19 декабря 2014 г., Екатеринбург : УрФУ, 2014. С.48-50.

УДК 536.2:66.045.12

Авдонькин Е. Д., Аюкаева Л. Р., Краснова Н. П.
Самарский государственный технический университет
lilia27-95@mail.ru

СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ЗА ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛАМИ

Аннотация. В работе рассмотрена проблема утилизации дымовых газов от современных водогрейных котлов малой и средней мощности. Предложена схема снижения температуры дымовых газов ниже точки росы.

Конденсационные водогрейные котлы малой и средней мощности стали распространяться в системах теплоснабжения сравнительно недавно. Главными преимуществами таких котлов являются низкая температура дымовых газов на выходе и, как следствие, высокий КПД. При использовании в таких котлах природного газа, в составе которого присутствует сероводород, образуется кислая среда в дымовом тракте вследствие растворения в конденсате агрессивных газов. Это неизбежно ведет к коррозии поверхностей нагрева и сокращению срока службы агрегата. Использование нейтрализаторов конденсата ведет к удорожанию отопительной системы. Еще одним недостатком данной системы отопления состоит в том, что при выходе из строя одного из элементов котла, то необходимо его полностью заменить на новый, что приводит к существенным экономическим затратам.

Альтернативой такого использования является утилизация дымовых газов за водогрейным котлом. Ниже представлена типовая схема утилизации дымовых газов за водогрейным котлом (рис.).

В этой схеме используется традиционный водогрейный котел, температура на выходе из которого составляет около 160 °С, к которому подсоединяется конденсационный теплообменник – в данном случае экономайзер. Он используется